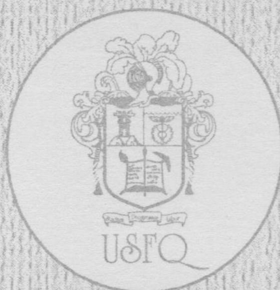
Carlos Marín



UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO



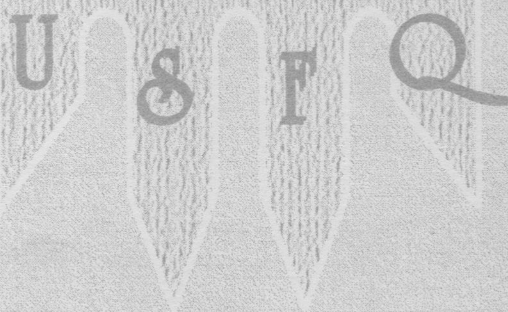









Serie de Documentos Socráticos



rigen el niverso

EL ORIGEN DEL UNIVERSO

CARLOS A. MARIN
UNIVERSIDAD SAÑ FRANCISCO DE QUITO
26 DE NOVIEMBRE DE 1998

El origen y el destino del Universo son descritos en el marco de la Teoría de la Gran Explosión. Se hace una breve introducción a la Teoría General de la Relatividad y algunas de sus consecuencias más importantes. Se revisan las cuatro interacciones fundamentales. Se utiliza el concepto de la velocidad de escape para entender la formación de los agujeros negros y estimar la densidad crítica de materia-energía en el Universo.

I. INTRODUCCION

En el año 340 A.C. el filósofo griego Aristóteles pensaba que la Tierra era el centro del Universo. Aristóteles creía que el Sol, la luna, los planetas y las estrellas giraban en órbitas circulares alrededor de la Tierra. Esta idea, aunque ligeramente modificada por Ptolomeo en el siglo II D.C., fue mantenida hasta el siglo dieciséis de nuestra era. En 1514 un monje polaco, Nicolás Copérnico, propuso un modelo diferente en el cual la Tierra y los demás planetas giraban alrededor del Sol en órbitas circulares (por cierto en el año 280 A.C. Aristarco de Samos ya había sugerido que el centro del sistema planetario estaba en el Sol y no en la Tierra). Este modelo pasó casi por completo desapercibido hasta que, un siglo más tarde, Galileo, con la ayuda de un telescopio, pudo observar el planeta Júpiter y se dio cuenta de la presencia de cuatro pequeños satélites que giraban a su alrededor, lo cual implicaba que no todo giraba alrededor de la Tierra, como los antiguos habían pensado. Esto constituyó un golpe mortal a la teoría de Aristóteles y Ptolomeo. Más o menos por el mismo tiempo, el astrónomo alemán Johannes Kepler, ayudado por las observaciones de un astrónomo danés (Tycho Brahe) pudo demostrar que las órbitas de los planetas alrededor del Sol no eran circulares como Copérnico había sugerido, sino más bien elípticas, estando el Sol en uno de los focos de la elipse. Una explicación clara del movimiento planetario solo surgió cuando Isaac Newton, en su libro "Principios Matemáticos de Filosofía Natural" (1687), postuló la existencia de una ley de gravitación universal, a partir de la cual pudo derivar las leyes de Kepler.

Esta visión del Universo cambió en el año de 1924 cuando el científico norteamericano Edwin Hubble, usando el telescopio de 100 pulgadas de diámetro (254 centímetros) del Monte Wilson en California, pudo demostrar que nuestra galaxia (la Vía Láctea) no era la única del Universo. Había muchas más. Ahora sabemos que por lo menos hay unos cien mil millones de galaxias, y que cada una de ellas contiene en promedio cien mil millones de estrellas. Una galaxia típica tiene unos cien mil años luz de diámetro. De acuerdo a su forma, las galaxias se clasifican en: espirales (la galaxia de Andrómeda, nuestra galaxia), elípticas (M87), irregulares (las nubes de Magallanes) y peculiares (M82). Las galaxias tienden a juntarse en grupos que van desde unas pocas docenas a muchos miles de galaxias, a estos grupos se les denomina cúmulos de galaxias. Un ejemplo de un cúmulo de Galaxias es el denominado "Grupo Local" formado por dos docenas de galaxias, entre las que se encuentran la Vía Láctea, Andrómeda, las nubes de Magallanes, M33, etc. Otro cúmulo de galaxias cercano es el cúmulo de Virgo, que contiene más de un millar de galaxias de todos los tipos y que puede ser observado en la constelación del mismo nombre. En 1929, después de haber catalogado numerosas galaxias junto con sus respectivos espectros luminosos, Hubble demostró que las galaxias presentaban un corrimiento hacia el rojo que era directamente proporcional a la distancia que les separa de nosotros. Esto significa que las galaxias se están alejando o que el Universo está inmerso en una expansión sistemática, lo cual implica que el Universo no tiene un centro (no hay un marco de referencia privilegiado o absoluto en el Universo). El ritmo de alejamiento típico entre dos galaxias vecinas es el mismo en todo el Universo. El Universo se está expandiendo en todos sus puntos de una manera uniforme.

II. TEORIA DE LA GRAN EXPLOSION

A principios del siglo XVIII, Isaac Newton descubrió que cuando la luz atraviesa un prisma, se divide en los diversos colores que la componen: el espectro luminoso (el espectro de un elemento dado o compuesto contiene lineas espectrales características. Estas líneas espectrales se generan por la emisión o absorción de luz causada por transiciones atómicas o moleculares). Cuando en una noche clara observamos una extrella o galaxia usando un telescopio, lo que vemos es el espectro luminoso de dicha estrella o galaxia. A partir del espectro luminoso podemos calcular la temperatura de la superficie de la estrella, los elementos químicos presentes en su atmósfera, etc.

El brillo aparente de una estrella depende de dos factores, la cantidad de luz que irradia (la luminosidad) y la distancia a la que se encuentra de nosotros. Cierto tipo de estrellas poseen la misma luminosidad sin importar cuán lejos estén de nosotros, por lo que si fuésemos capaces de observar estas estrellas en un galaxia cercana, midiendo su brillo aparente, seríamos capaces de determinar la distancia a la que se encuentra dicha galaxia. Usando esta técnica, Hubble fue capaz de demostrar que la galaxia de Andrómeda se encuentra a un millón y medio de años luz de distancia de nosotros (un año luz representa la distancia recorrida por la luz en un año: unos 9.5 billones de kilómetros aproximadamente ; la velocidad de la luz es 300000 kilómetros por segundo). La luz que hoy en día nos llega de Andrómeda comenzó su viaje hacia nosotros hace un millón y medio de años, y por lo tanto, cuando observamos esta galaxia la vemos como fue en el pasado; similarmente cuando vemos el Sol, lo vemos como fue hace 8.3 minutos aproximadamente, ya que el Sol se encuentra a ciento cincuenta millones de kilómetros de nosotros. Usando el mismo procedimiento, se puede demostrar que el Grupo Local se extiende sobre un volumen de un megaparsec en diámetro (1 megaparsec = 3.26 millones de años luz).

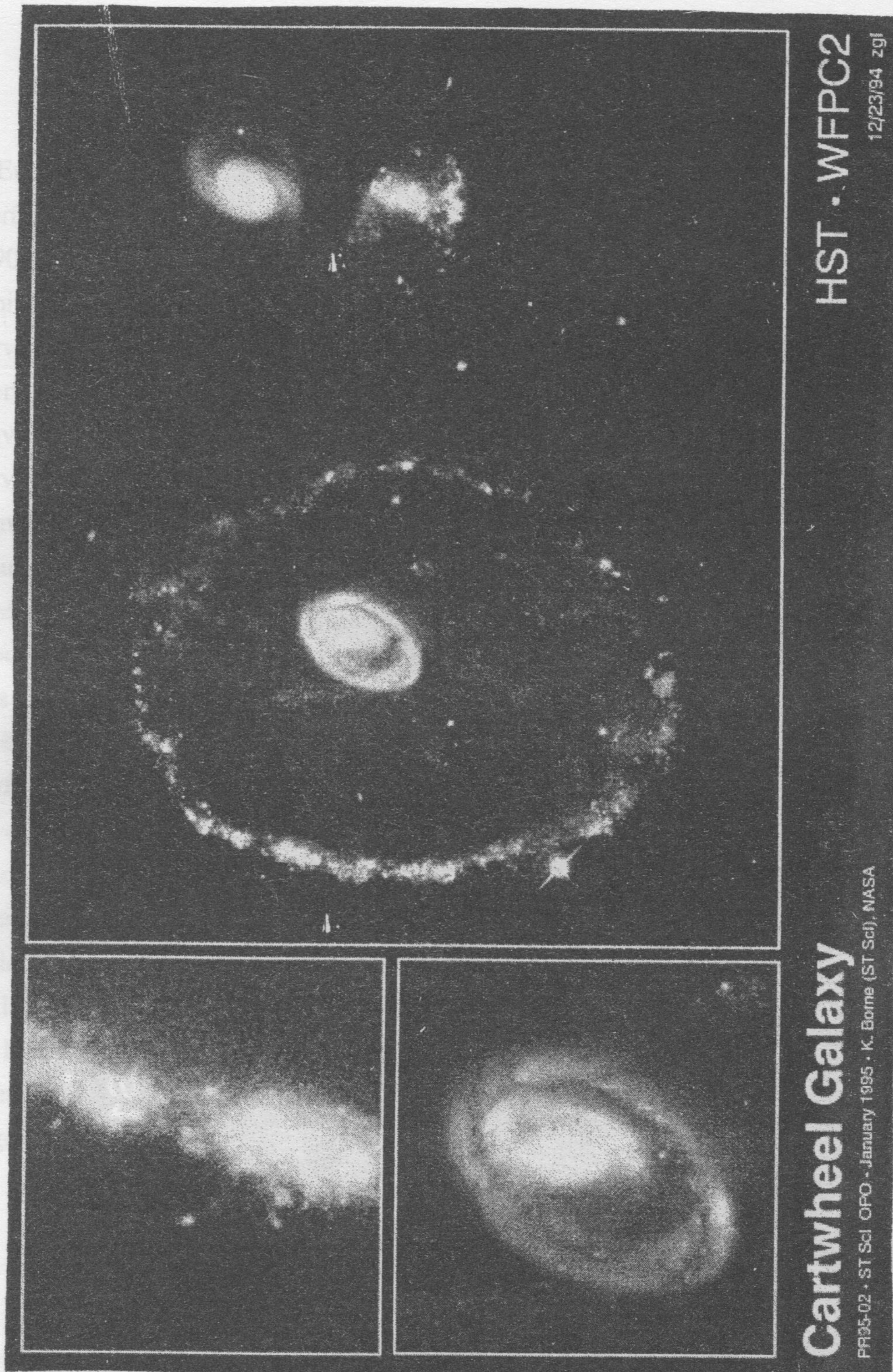
Hubble calculó la distancia a muchísimas galaxias cercanas a la nuestra. Al estudiar los espectros de estas galaxias con detenimiento, Hubble pudo constatar que dichos espectros estaban corridos hacia el extremo del espectro correspondiente al color rojo. Qué significa dicho corrimiento? Para entenderlo mejor, describamos brevemente el efecto Doppler. Cuando una ambulancia pasa cerca de nosotros, podemos notar que el tono de la sirena se hace más agudo a medida que se acerca y se vuelve más grave a medida que se aleja. Este efecto se conoce con el nombre de "efecto Doppler". La policía usa radar doppler para medir la velocidad de los vehículos a partir de las frecuencias de los pulsos de las ondas de radio reflejadas en los mismos. Con las ondas luminosas ocurre un fenómeno parecido. Cuando las ondas de luz procedentes de una fuente luminosa, tales como una estrella o una galaxia se aproximan hacia nosotros, su frecuencia aumenta (es decir que su longitud de onda disminuye), y por lo tanto las vemos corridas hacia el extremo azul del espectro. Cuando las ondas se alejan de nosotros, su frecuencia disminuye (es decir que su longitud de onda aumenta), y las ondas presentan un corrimiento hacia el extremo rojo del espectro. El corrimiento hacia el rojo en el espectro de las galaxias significa, por lo tanto, que ellas se están alejando de nosotros. En 1929 Hubble descubrió que el corrimiento hacia el rojo de las galaxias no es aleatorio (ver referencia (1)) , sino que es directamente proporcional a la

distancia que nos separa de ellas. Esto significa que el Universo no es estático, como se había pensado antes, sino que se está expandiendo.

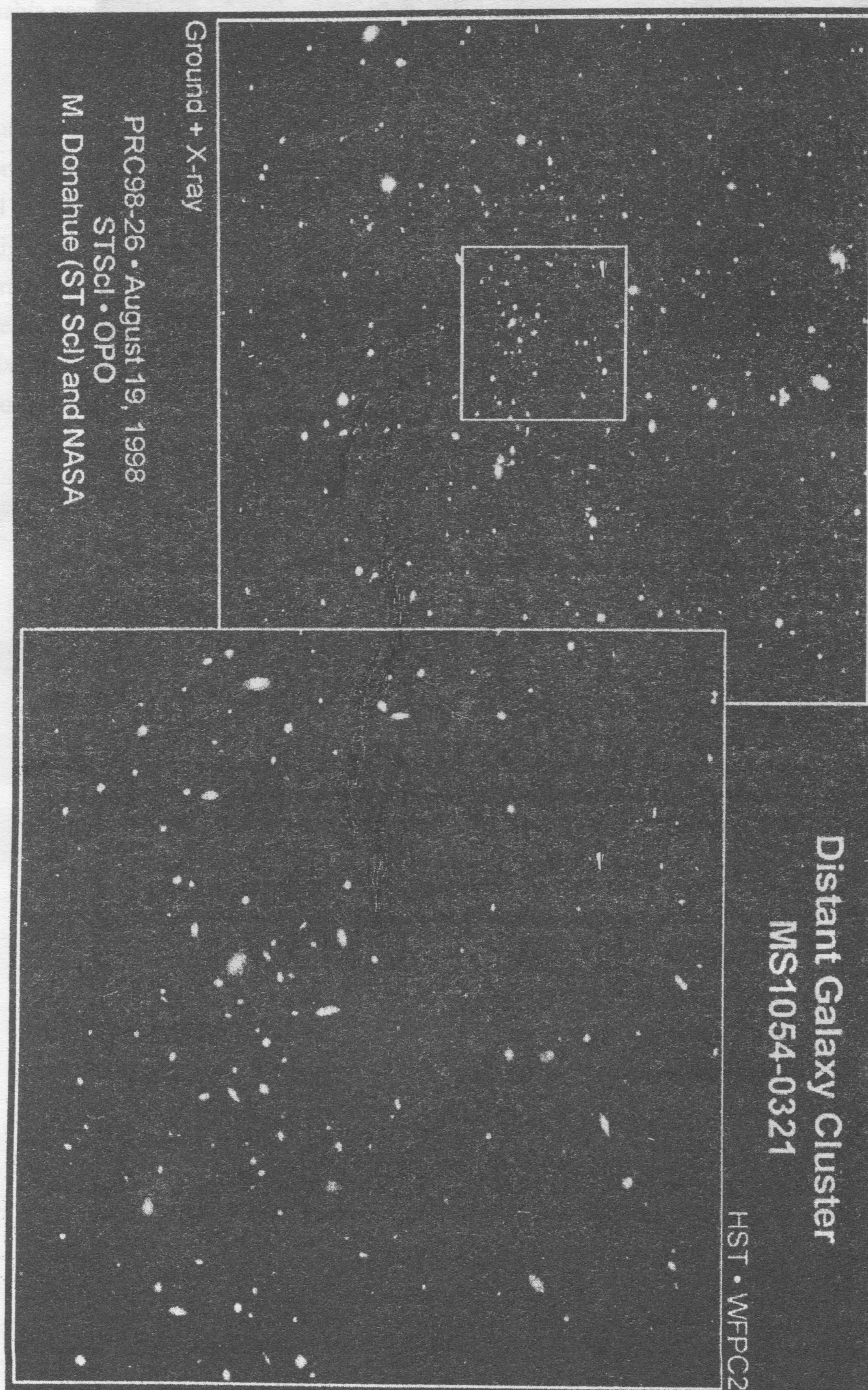
El hecho de que el Universo esté inmerso en una expansión significa que debe haber habido un tiempo en el pasado en el que las galaxias estaban más juntas. De hecho, al principio, todo el Universo debe haber estado concentrado en un espacio muy pequeño en el que las temperaturas, las densidades y la curvatura del espacio-tiempo debieron ser gigantescas. En el instante cero, la densidad, la temperatura y la curvatura del Universo eran infinitas. Luego, a medida que el Universo se fue expandiendo y enfriando, las densidades bajaron. A este comienzo explosivo se le conoce como "Big-Bang" (Gran Explosión). No tiene sentido hablar sobre qué sucedió antes del Big-Bang (al menos desde nuestro punto de vista), ya que el espacio-tiempo fue creado en la Gran Explosión.



Galaxia de Andrómeda
Fotografía de los Observatorios Hale



Galaxia Cartwheel
Fotografía del Telescopio Espacial Hubble

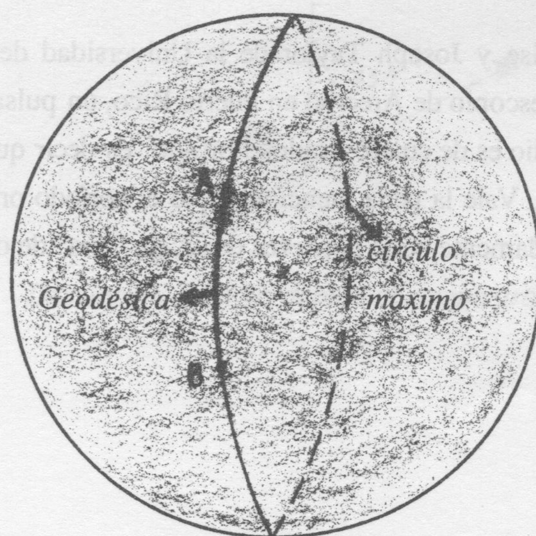


Cúmulo de Galaxias

Fotografía del Telescopio Espacial Hubble

III. TEORIA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

Entre 1908 y 1914, Albert Einstein realizó varios intentos sin éxito para obtener una teoría de la Gravitación que fuera compatible con la Teoría Especial de la Relatividad (1905). En 1915 finalmente lo logró y la llamó "Teoría General de la Relatividad". La genialidad de Einstein fue suponer que el espacio-tiempo no es plano, sino que está curvado debido a la distribución de materia y energía en él presente. Así por ejemplo, la Tierra se mueve alrededor del Sol en una órbita elíptica, no debido a la acción de una fuerza gravitacional, sino más bien debido al hecho de que el espacio-tiempo alrededor del Sol está curvado; entonces, la Tierra sigue la trayectoria más parecida a una recta en el espacio-tiempo curvo. La superficie de la Tierra, por ejemplo, es una superficie curva bidimensional sin bordes o límites; sobre dicha superficie la distancia más corta entre dos puntos no es una línea recta sino un arco de círculo máximo llamado geodésica. Una geodésica es la distancia más corta entre dos puntos en una superficie curva. La distancia más corta entre dos aeropuertos (por ejemplo los aeropuertos de Quito y Boston) es una geodésica, de manera que si quisiéramos ir de Quito a Boston lo más rápidamente posible tendríamos que viajar a lo largo de la geodésica que conecta dichas ciudades. Las trayectorias de partículas sujetas a la acción de fuerzas no nulas se pueden interpretar como geodésicas en un espacio donde el tensor de curvatura (que determina la curvatura del espacio-tiempo) no es nulo. Esto es equivalente a introducir marcos de referencia acelerados, que se mueven de tal forma que las fuerzas que actúan sobre las partículas se anulan. Por lo tanto, el concepto de fuerza no necesita entrar en dinámica, y las trayectorias de las partículas se pueden interpretar como geodésicas cuyas propiedades vienen determinadas por las propiedades métricas del espacio-tiempo. Así, la gravedad tiene un origen puramente geométrico.



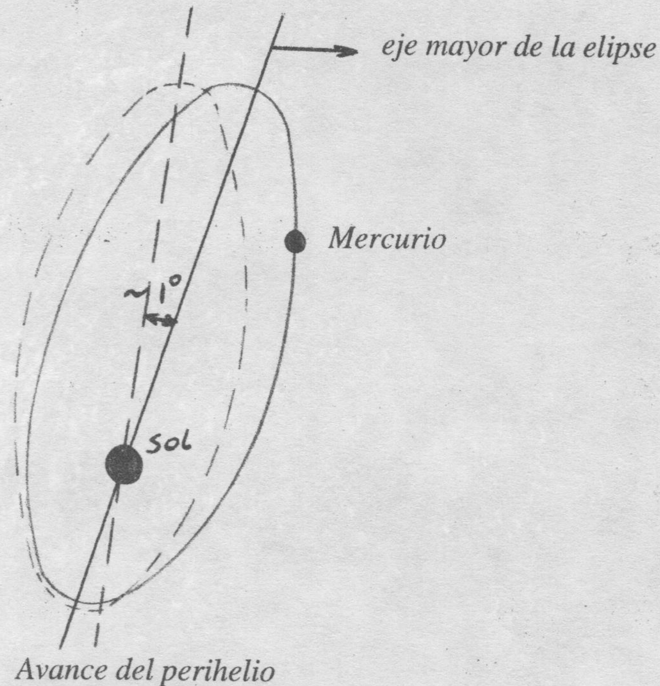
La Teoría General de la Relatividad se resume en las ecuaciones de campo de Einstein (2) (ver apéndice A). A partir de estas ecuaciones se puede determinar la métrica del espacio-tiempo para una distribución dada de materia (el tensor métrico describe la desviación del teorema de Pitágoras en un espacio curvo). Las ecuaciones de campo de Einstein nos conducen a la predicción de efectos extraordinarios, como por ejemplo:

a) Avance del Perihelio: Las órbitas de los planetas predichas por la Teoría General de la Relatividad (T.G.R.) son casi exactamente las mismas que predice la teoría newtoniana, salvo que la T.G.R., predice que el eje mayor de la elipse que describe un planeta en su movimiento de traslación alrededor del Sol, debería girar alrededor del Sol. El planeta Mercurio, al estar más cerca del Sol, sufre los efectos gravitatorios más fuertes. El eje mayor de su elipse rota alrededor del Sol a razón de un grado cada diez mil años. Este fenómeno se conoce con el nombre de avance del perihelio. Matemáticamente el avance del perihelio viene dado por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{6\pi\, MG}{a\left(1-e^{2}\right)c^{2}} \qquad (1)$$

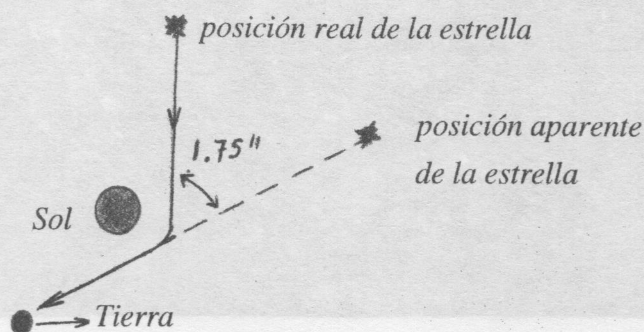
donde $e = 0.206$ es la excentricidad de la órbita de Mercurio, $a = 5.79 * 10^{10}\ m$ es la longitud del semieje mayor de la órbita del planeta Mercurio en su movimiento alrededor del Sol y $M = 1.989 * 10^{30}\ kg$ representa la masa del Sol. Los valores de ε para Venus, Tierra y Marte son de 9, 4 y 1 segundo de arco por siglo respectivamente. Las medidas por radar de la órbita de Mercurio realizadas desde el año 1966 han demostrado que la predicción relativista es correcta dentro del 0.5 por ciento (esto quiere decir, que el error del valor predicho por la T.G.R en relación a los valores medidos experimentalmente es a lo mucho de un 0.5 por ciento).

En el año 1974, Russell Hulse y Joseph Taylor de la Universidad de Massachusetts descubrieron, usando el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico, un pulsar binario: PSR 1913+16; el avance de su perihelio es de cuatro grados por año, es decir que su eje mayor completa una vuelta en 91 años. Vale la pena mencionar que el período orbital del pulsar binario es muy breve, aproximadamente ocho horas (es decir, un "año" de ocho horas).

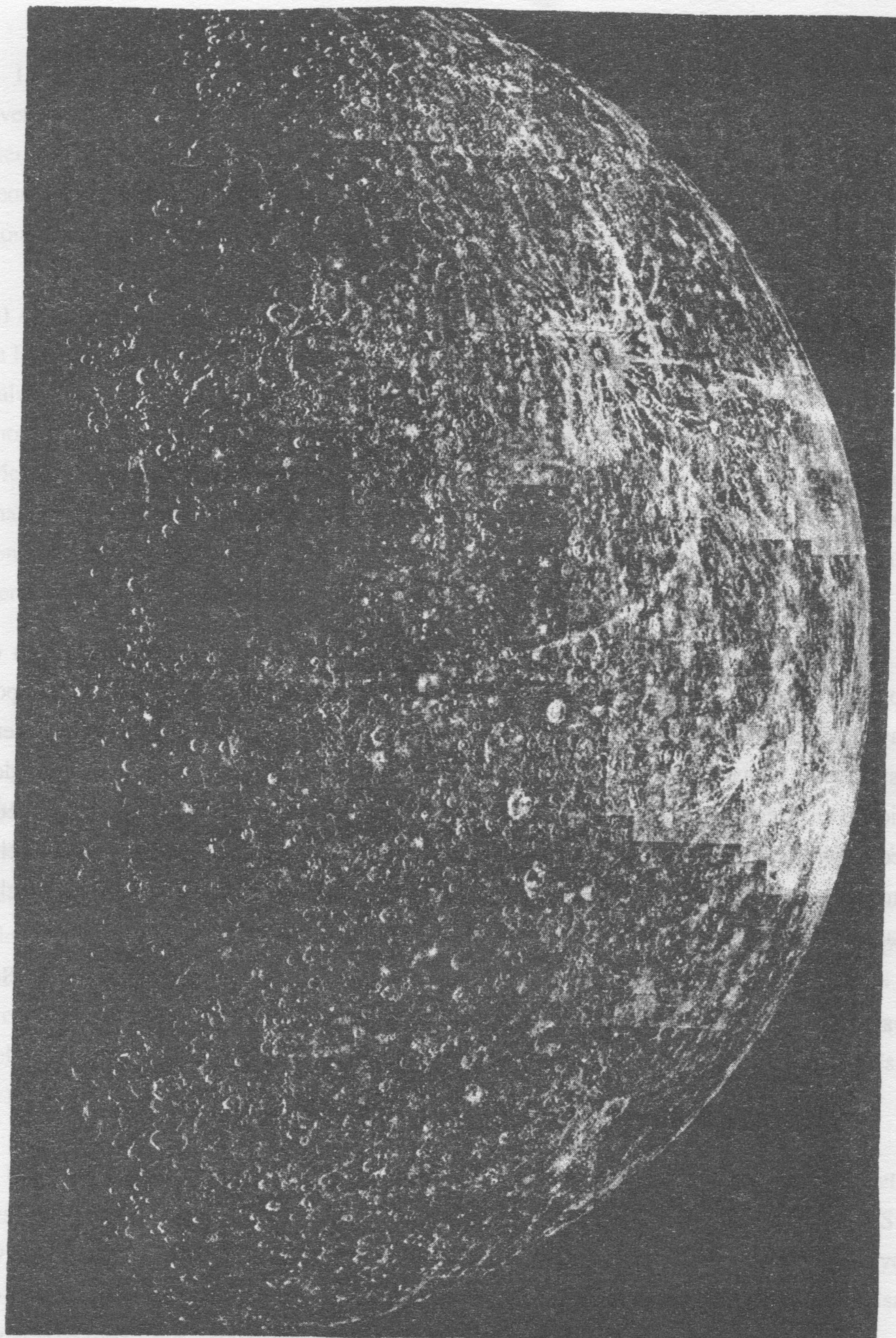


Avance del perihelio

b) Desviación de la luz: Los rayos de luz también deben seguir geodésicas en el espacio-tiempo. La T.G.R. predice que la luz debe ser desviada por los campos gravitacionales. La luz de una estrella distante que pase cerca del limbo del Sol será desviada un pequeño ángulo, con lo cual la estrella parecerá estar, para un observador ubicado en Tierra, en una posición diferente de su posición real. Este efecto se lo puede medir con mayor facilidad en un eclipse de Sol, tomando una fotografía de una estrella cerca del limbo del Sol, y luego comparándola con otra fotografía de la misma estrella cuando el Sol no está en el campo visual. En el caso del Sol la desviación es $\Phi = 4GM/Rc^2 = 1.75$ segundos de arco (cinco diez milésimas de grado). El radio del Sol es aproximadamente seiscientos noventa y seis mil kilómetros.



Desviación de la luz debido al campo gravitacional del Sol



Fotografía de Mercurio tomada por el Mariner 10

c) Corrimiento al rojo gravitacional: Cuando un fotón de luz se propaga hacia arriba, a través del campo gravitatorio terrestre, su energía disminuye produciéndose un incremento de su longitud de onda, por lo que un observador en tierra notará que la luz se torna rojiza: a este efecto se le conoce como corrimiento al rojo gravitacional. Por ejemplo, para un fotón que se propaga hacia arriba una altura de 20 metros a partir del nivel del mar , la pérdida en energía es $\approx -2.2 \times 10^{-15}$. Si el fotón, por el contrario, cae a través del campo gravitacional, su energía aumenta, lo cual implica una disminución de su longitud de onda, y el fotón presentará un corrimiento hacia el azul . Este cambio en energía de los fotones debido a la gravedad de la Tierra fue medido en 1960 por Robert Pound y Glen Rebka usando una técnica de espectroscopía nuclear conocida como resonancia Mossbauer. La fuente de fotones eran rayos gamma de 14.4 KeV provenientes del decaimiento de $^{57}Fe^{*}$ (un estado excitado del hierro). Los resultados experimentales calzaron perfectamente con las predicciones de Einstein.

d) Luz absorbida o emitida por un átomo: Si un átomo absorbe o emite luz, la frecuencia de la luz absorbida o emitida (en una transición entre dos niveles de energía) depende del potencial del campo gravitacional donde se encuentra. Esto significa que la frecuencia de la luz emitida por un átomo en una estrella será menor que la frecuencia de la luz emitida por el mismo átomo si se encontrara libre en el espacio. En el caso del Sol, el cambio de frecuencia es $-GM/Rc^2 \approx -2 * 10^{-6}$ (2 millonésimas). Mediciones de algunas líneas espectrales características del sodio, en el expectro solar, han confirmado las predicciones de Einstein dentro del 5%.

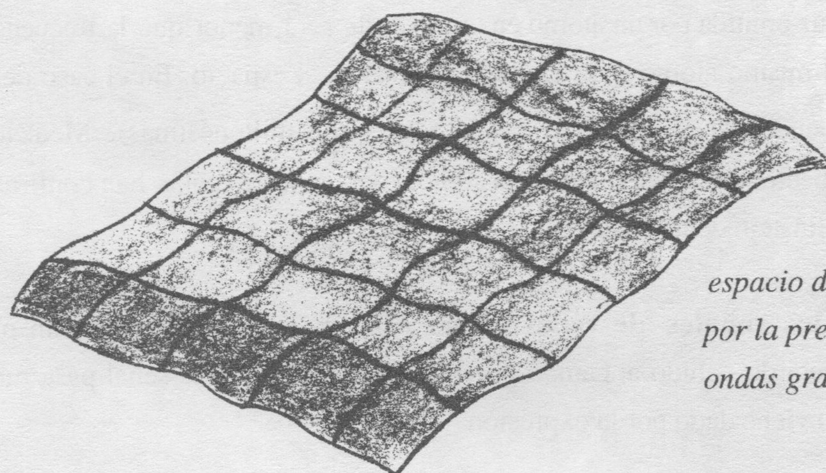
e) Retardo de las señales de radar: Una señal de radar reflejada en un planeta o satélite sufre un retardo debido al campo gravitacional del Sol. Si la señal pasa muy cerca del Sol, el retardo viene dado por la expresión

$$\Delta T \approx \frac{4GM}{c^3} \ln\left(\frac{4X_E X_P}{R^2}\right) \qquad (2)$$

donde X_P representa la distancia entre el Sol y el planeta o satélite y $X_E = 1.5 * 10^{11}$ *metros* es la distancia entre la Tierra y el Sol. Para el planeta Mercurio ($X_P = 5.79 * 10^{10}$ *metros*) el retardo es de aproximadamente unos 220 microsegundos. El retardo de las señales de radar ha sido verificado enviando señales no solo a Mercurio, sino

también a Venus y satélites artificiales como los Mariner 6, 7, 9 y las naves Vikingo (enviadas hacia Marte). Las mediciones confirman las predicciones de Einstein dentro del 0.1%.

f) Ondas gravitacionales: Son perturbaciones del campo gravitacional que se propagan a la velocidad de la luz. Son ondas de espacio-tiempo curvo que se generan en eventos colosales, tales como la explosión de una estrella, en los agujeros negros, etc. Las ondas gravitacionales son ondulaciones auténticas de geometría. En los años 60, Joseph Weber de la Universidad de Maryland, ideó un dispositivo para detectar la presencia de ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales son muy difíciles de detectar. Si una estrella de 10 masas solares colapsara para formar un agujero negro, las ondas gravitacionales generadas inducirían en una barra de un metro de longitud una vibración de tan sólo $10^{-17}\ m$. Entre 1974 y 1978 Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron evidencias de que el pulsar binario PSR 1913+16 está emitiendo ondas gravitacionales. Por estas evidencias, recibieron el premio Nobel de Física, en el año 1993.



espacio deformado por la presencia de ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales son ondulaciones auténticas de geometría

Adicionalmente, la T.G.R. predice la existencia de agujeros negros como veremos más adelante; sin embargo, una de las predicciones más impresionantes, y a la que Einstein no le prestó mucha atención debido a su creencia de un Universo estático, es precisamente la Expansión del Universo.

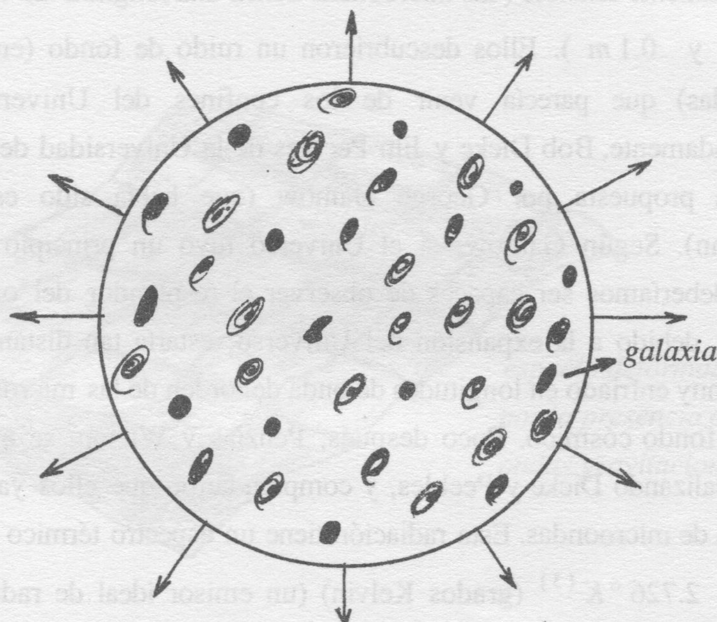
IV. EL MODELO DE FRIEDMANN

En el año de 1922, el físico y matemático ruso Alexander Friedmann, usando las ecuaciones de campo de Einstein, probó que el Universo debería estar expandiéndose a cambio de que dos suposiciones básicas fueran ciertas: "El Universo es isótropo y homogéneo". La primera suposición (isotropía) nos dice que a gran escala (a nivel de galaxias y cúmulos de galaxias en el espacio profundo) el Universo parece el mismo en cualquier dirección que se observe. La segunda hipótesis (homogeneidad) dice que lo mismo sería cierto para un observador ubicado en otra galaxia. El descubrimiento de Hubble en 1929, fue de allí, un gran triunfo para la T.G.R.

La evidencia de la isotropía del Universo a gran escala se dio en 1965 cuando dos científicos americanos que trabajaban para los laboratorios de la Bell Telephone en Nueva Jersey, Arno Penzias y Robert Wilson, estaban probando un detector de microondas extremadamente sensible (las microondas tienen una longitud de onda comprendida entre $10^{-3}\,m$ y $0.1\,m$). Ellos descubrieron un ruido de fondo (en forma de radiación de microondas) que parecía venir de los confines del Universo. Al mismo tiempo aproximadamente, Bob Dicke y Jim Peebles de la Universidad de Princeton, investigaban una idea propuesta por George Gamow (que había sido estudiante de Alexander Friedmann). Según Gamow, si el Universo tuvo un principio muy denso y caliente, todavía deberíamos ser capaces de observar el resplandor del origen del Universo; sin embargo, debido a la expansión del Universo, estaría tan distante que hoy en día nos llegaría muy enfriado en longitudes de onda del orden de las microondas en la forma de un ruido de fondo cósmico. Poco después, Penzias y Wilson, se enteraron del trabajo que venían realizando Dicke y Peebles, y comprendieron que ellos ya habían descubierto esa radiación de microondas. Esta radiación tiene un espectro térmico con una temperatura del orden de $2.726\,{}^{\circ}K$ [3] (grados Kelvin) (un emisor ideal de radiación, o cuerpo negro, emite un espectro característico que depende unicamente de su temperatura. El pico o punto más alto de la curva de radiación ocurre a una longitud de onda que es inversamente proporcional a la temperatura de la radiación. La radiación de fondo cósmico se aproxima bastante bien al espectro térmico que es característico de un cuerpo negro a la temperatura de 2.726 grados Kelvin). Por su descubrimiento, Penzias y Wilson, recibieron el premio Nobel de Física, en el año 1978. El ruido de fondo cósmico es prácticamente igual en todas direcciones y nunca varía más de 5 partes en un millón. La existencia del ruido de

fondo cósmico, es entonces, una confirmación extremadamente precisa de la primera hipótesis de Friedmann sobre la isotropía del Universo a gran escala.

No hay evidencia científica a favor de la segunda hipótesis (la homegeneidad del Universo a gran escala). Confiamos en ella solo por razones de modestia. El que las galaxias se estén alejando de nosostros podría sugerir la posibilidad de que nosotros estamos en el centro de la expansión y por lo tanto en el centro del Universo (como pensaban los antiguos griegos). Sin embargo, existe una explicación alternativa. Si imaginamos al Universo como un globo en el que hemos dibujado numerosos puntos que representan las galaxias, a medida que inflamos el globo, podemos observar que los puntos sobre la superficie del globo (las galaxias) se alejan, y se alejan con una velocidad que es directamente proporcional a la distancia que les separa. Visto así, el Universo no tiene ninguna clase de borde ni límite, y desde cualquier punto sobre la superficie del globo veríamos a nuestro alrededor exactamente lo mismo, por lo que no se puede decir que exista un punto que sea el centro de la expansión y por lo tanto, que se constituya en el centro del Universo.



La expansión del Universo

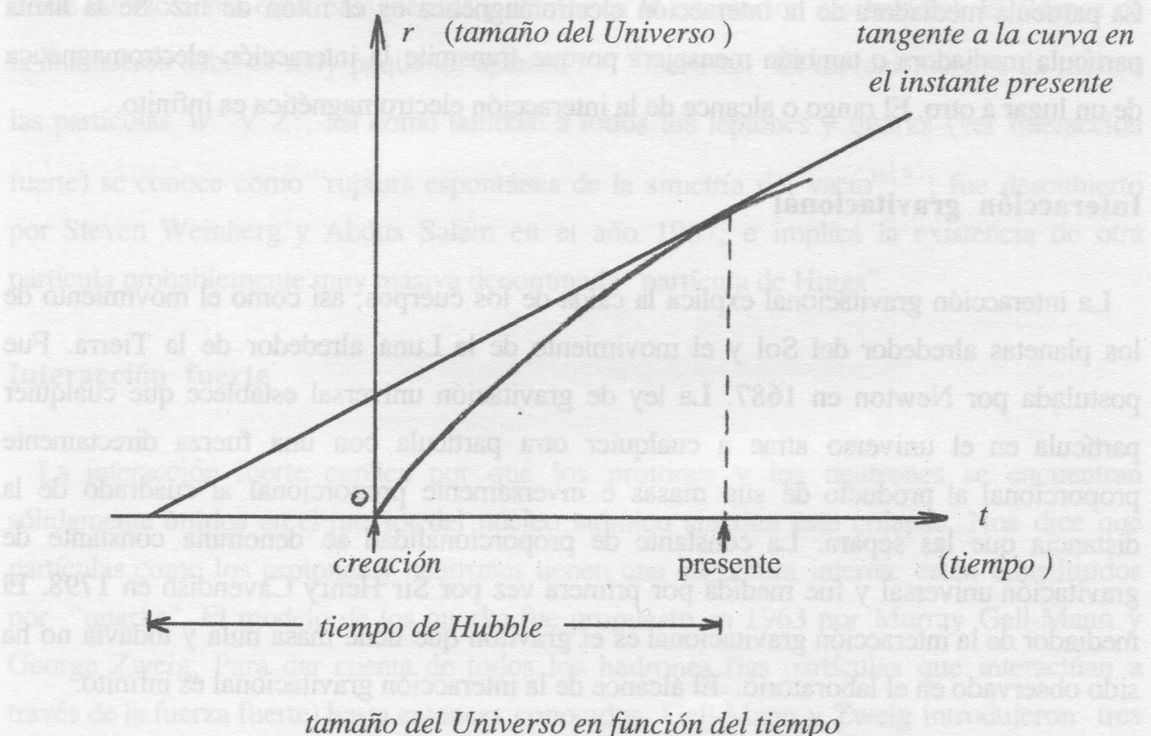
V. EDAD DEL UNIVERSO

La edad del Universo se mide a partir del parámetro de Hubble (H), que es una medida del ritmo de expansión del Universo. En la actualidad el ritmo de expansión es

prácticamente constante: el Universo se expande entre un cinco y un diez por ciento cada mil millones de años. Sin embargo, al principio de la gran explosión el ritmo de expansión fue muy rápido. El valor de H se lo determina midiendo la velocidad de separación de dos galaxias típicas separadas una cierta distancia. El valor de H se encuentra comprendido entre 50 y 85[4] kilómetros/segundo y por megaparsec. Al inverso del parámetro de Hubble, que tiene dimensiones de tiempo, se le denomina tiempo de Hubble. Tomando el valor más bajo del ritmo de expansión (H = 50 km/seg y por megaparsec), el tiempo de Hubble es aproximadamente $6.17 * 10^{17}$ segundos (más o menos unos veinte mil millones de años).

Si los efectos gravitatorios dominantes son debidos a las galaxias, la edad del Universo es dos tercios del tiempo de Hubble: 13 mil millones de años. Por otro lado, si la masa-energía del Universo estuviera dominada por la radiación, la edad del Universo sería la mitad del tiempo de Hubble: 10 mil millones de años.

En la figura que sigue se representa el tamaño del Universo "*r*" versus el tiempo "*t*". El espacio se dilata continuamente; como resultado disminuye la densidad de materia y las galaxias se alejan entre sí. En la figura se ve como el radio de un volumen esférico de espacio "*r*" crece a un ritmo cada vez menor.



tamaño del Universo en función del tiempo

La física del Universo primitivo es básicamente física de partículas elementales y cosmología. Por lo cual, si queremos comprender las diversas etapas por las que atravezó el Universo en sus comienzos, debemos primero revisar algunas nociones básicas sobre las interacciones fundamentales que existen en el Universo.

VI. INTERACCIONES FUNDAMENTALES

En el Universo existen cuatro interacciones fundamentales: La interacción fuerte, la interacción electromagnética, la interacción débil y la interacción gravitacional. De las cuatro las más familiares para nosotros son las interacciones electromágnetica y gravitacional.

Interacción electromagnética

Los fenómenos eléctricos y magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos alrededor del año 700 A.C. En el año 1865, James Clerk Maxwell unificó electricidad y magnetismo en las famosas ecuaciones de Maxwell. Las ecuaciones de Maxwell predecían la existencia de ondas electromagnéticas (perturbaciones del campo electromagnético que se propagan a la velocidad de la luz), cuya existencia fue probada por Heinrich Hertz en 1887. La partícula mediadora de la interacción electromagnética es el fotón de luz. Se la llama partícula mediadora o también mensajera porque transmite la interacción electromagnética de un lugar a otro. El rango o alcance de la interacción electromagnética es infinito.

Interacción gravitacional

La interacción gravitacional explica la caída de los cuerpos, así como el movimiento de los planetas alrededor del Sol y el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. Fue postulada por Newton en 1687. La ley de gravitación universal establece que cualquier partícula en el universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. La constante de proporcionalidad se denomina constante de gravitación universal y fue medida por primera vez por Sir Henry Cavendish en 1798. El mediador de la interacción gravitacional es el gravitón que tiene masa nula y todavía no ha sido observado en el laboratorio. El alcance de la interacción gravitacional es infinito.

Interacción débil

La interacción débil explica por qué hay partículas inestables que decaen radiactivamente. Por ejemplo, el neutrón libre (n) decae emitiendo un protón (p), un electrón (e^-) y un antineutrino tipo electrón ($\bar{\nu}_e$), en aproximadamente 15 minutos. Los neutrinos y sus antipartículas, los antineutrinos, son partículas producidas en el interior de las estrellas; no poseen carga eléctrica y prácticamente no tienen masa. La colaboración Super-Kamiokande en Japón ha podido medir recientemente la masa del neutrino tipo electrón, resultando ser aproximadamente una diezmillonésima parte de la masa del electrón (la masa del electrón es $9.1 * 10^{-31}\ kg$. En comparación, la masa del protón es 1839.8 veces la masa del electrón. Por otro lado, el neutrón es 1842.4 veces más pesado que el electrón). El muón[5] (una partícula 207 veces más pesada que el electrón : μ) decae en dos microsegundos emitiendo un neutrino tipo muón (ν_μ) un electrón y un antineutrino tipo electrón (ver diagrams (a) y (b)). Los mediadores de la interacción débil son los bosones masivos cargados $W^{\pm}$ y el bosón neutro Z° descubiertos por un equipo de investigación dirigido por Carlo Rubbia y Simon Van der Meer en el CERN (Centro Europeo para Investigaciones Nucleares) en Ginebra en 1983. La masa de estos bosones es alrededor de 100 veces la masa del protón. El descubrimiento de estas partículas permitió la unificación de las interacciones electromagnéticas y débiles en la interacción electrodébil. El alcance de la interacción débil es muy pequeño, apenas 10^{-18} *metros*. El mecanismo que da masa a las partículas $W^{\pm}$ y Z°, así como también a todos los leptones y quarks (ver interacción fuerte) se conoce como "ruptura espontánea de la simetría del vacío"[6]; fue descubierto por Steven Weinberg y Abdus Salam en el año 1967, e implica la existencia de otra partícula probablemente muy masiva denominada "partícula de Higgs".

Interacción fuerte

La interacción fuerte explica por qué los protones y los neutrones se encuentran sólidamente unidos en el interior del núcleo atómico sin que este colapse. Nos dice que partículas como los protones y neutrones tienen una estructura interna: están constituídos por "quarks". El modelo de los quarks fue propuesto en 1963 por Murray Gell-Mann y George Zweig. Para dar cuenta de todos los hadrones (las partículas que interactúan a través de la fuerza fuerte) hasta entonces conocidos, Gell-Mann y Zweig introdujeron tres

tipos distintos de quarks, llamados u (up = arriba), d (down = abajo), y s (strange = extraño). Así por ejemplo, el protón está constituído por dos quarks u y un quark d. El neutrón, por otro, lado está formado por un quark u y dos quarks d. El pión con carga positiva contiene un quark u y un antiquark d (el antiquark es la antipartícula del quark. Las antipartículas son idénticas a las partículas, salvo que tienen carga eléctrica opuesta. Sinembargo, lo más importante de todo es que cuando una partícula se junta con su correspondiente antipartícula, ambas se aniquilan emitiendo radiación. Así por ejemplo, el antiprotón que es la antipartícula del protón tiene la misma masa del protón, pero carga eléctrica opuesta (negativa). Si un protón colisionara con un antiprotón, se aniquilarían emitiendo muchísima radiación). El Kaón neutro está formado por un quark d y un antiquark s. Los quarks tienen cargas eléctricas fraccionarias (+ 2/3 para el quark u y – 1/3 para los quarks d y s). Los antiquarks tienen cargas eléctricas de signo contrario a la de los quarks, por ejemplo el antiquark u ($\bar{u}$) tiene una carga eléctrica igual a $-2/3$. En 1969, en una serie de experimentos históricos realizados en el acelerador lineal de Stanford, se obtuvo una prueba física directa de la existencia de los quarks. Los mediadores de la interacción fuerte son partículas a las que se les llama gluones. Hay ocho tipos de gluones y no tienen masa. El alcance de las interacciones fuertes es del orden del tamaño del núcleo atómico: 10^{-15} *metros*.

Las propiedades de las diversas partículas elementales se estudian usando aceleradores de partículas. El acelerador de mayor energía en el mundo hoy en día está en el Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory), nombre dado en honor a Enrico Fermi. Está ubicado en las afueras de Chicago, Illinois. Allí, se hace colisionar protones y antiprotones después de moverlos alrededor de un anillo de casi dos kilómetros de diámetro. Los protones y antiprotones alcanzan una energía total equivalente a 1800 veces la masa de un protón.

Aunque toda la materia común del Universo está hecha solamente de los quarks u , d y de los leptones e^- , ν_e, existen en realidad seis leptones y seis quarks. En la tabla que sigue a continuación se indican los símbolos de los leptones y los quarks así como también sus respectivas masas y cargas en unidades de masa y carga del electrón [(4)].

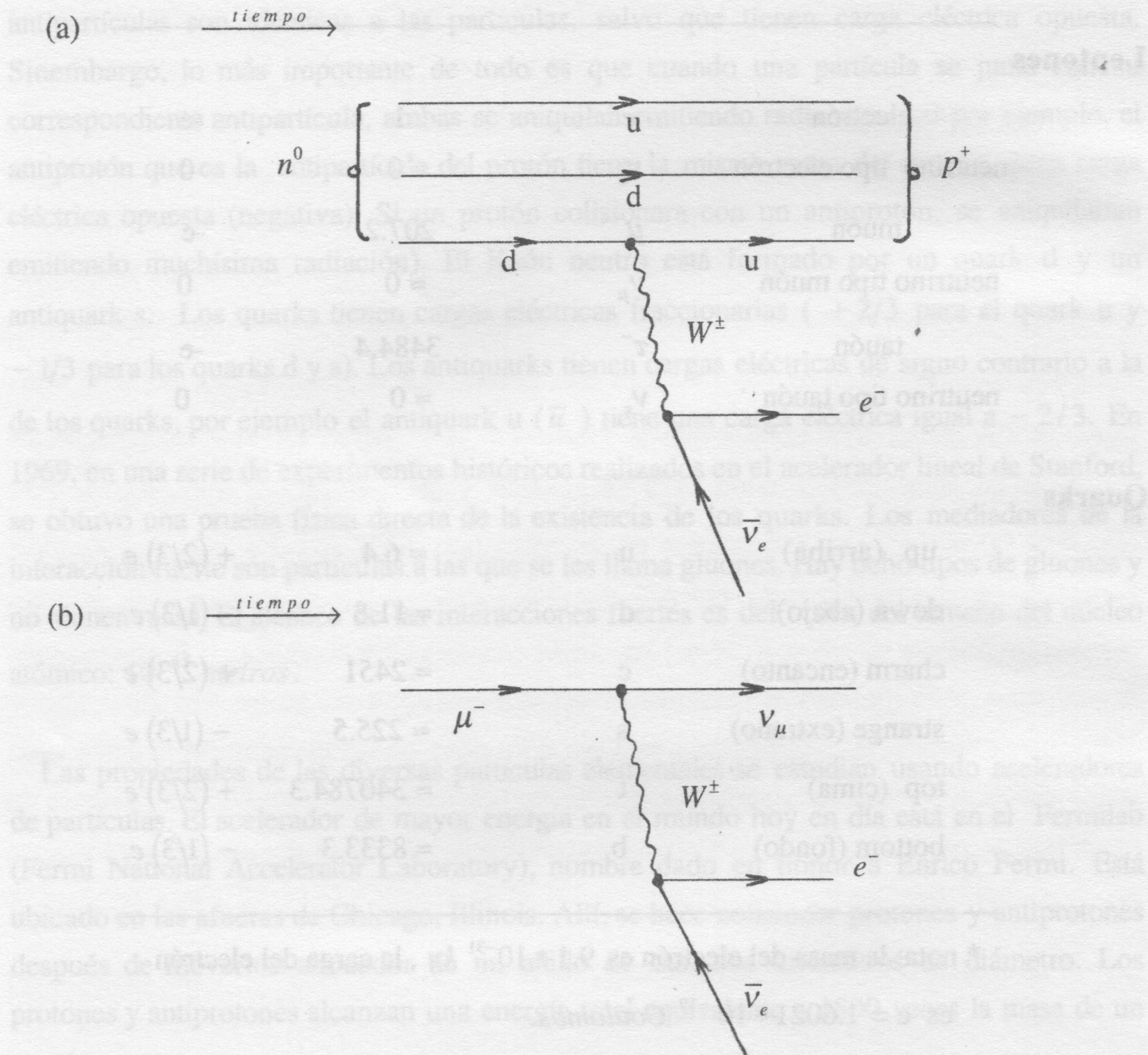
	Partícula	Símbolo	Masa	Carga
Leptones				
	electrón	e^-	1	-e
	neutrino tipo electrón	ν_e	≈ 0	0
	muón	μ^-	207.2	-e
	neutrino tipo muón	ν_μ	≈ 0	0
	tauón	τ^-	3484.4	-e
	neutrino tipo tauón	ν_τ	≈ 0	0
Quarks				
	up (arriba)	u	≈ 6.4	$+(2/3)\,e$
	down (abajo)	d	≈ 11.8	$-(1/3)\,e$
	charm (encanto)	c	≈ 2451	$+(2/3)\,e$
	strange (extraño)	s	≈ 225.5	$-(1/3)\,e$
	top (cima)	t	≈ 340784.3	$+(2/3)\,e$
	bottom (fondo)	b	≈ 8333.3	$-(1/3)\,e$

* nota: la masa del electrón es $9.1 * 10^{-31}\ kg$, la carga del electrón es $e = 1.6021 * 10^{-19}\ Coulombs$.

De la tabla podemos ver que, por ejemplo, el tauón es 3484.4 veces más pesado que el electrón, el quark b es 8333.3 veces más pesado que el electrón, el quark top es el más masivo: trescientos cuarenta mil veces más pesado que el electrón.

El decaimiento de una partícula se puede representar en un diagrama simple llamado *diagrama de Feynman* , desarrollado por Richard P. Feynman (diagramas similares se pueden construir para representar la interacción de dos partículas, por ejemplo un electrón y un muón o también dos electrones via interacción electromagnética y débil). Los diagramas

de Feynman correspondientes a los decaimientos del neutrón (a) y del muón (b), se indican a continuación. En dichos diagramas el tiempo avanza hacia la derecha.



Para comparar la intensidad relativa de las cuatro interacciones fundamentales, notemos que si nosotros asignamos un valor 1 a la interacción fuerte, la interacción electromagnética es 10^{-2} de la interacción fuerte (cien veces más débil), la interacción débil es 10^{-6} de la interacción fuerte (un millón de veces más débil) y la interacción gravitacional es apenas 10^{-39} veces la interacción fuerte. Esto significa que a escala microscópica (atómica) las interacciones más importantes son las interacciones fuerte, electromagnética y débil; mientras que a escala macroscópica (planetas, estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias), la dominante es la interacción gravitacional.

VII. HISTORIA DEL UNIVERSO PRIMITIVO

El Universo primitivo atravesó por una sucesión de épocas que las describimos brevemente a continuación [7]:

1.- Era de Planck: Los efectos cuánticos gravitatorios debieron ser muy importantes en esta época, produciéndose probablemente grandes distorsiones en la estructura del espacio-tiempo (La mecánica cuántica es la teoría de la interacción de materia y radiación [8]. Descansa sobre la idea original de Planck de que los cuerpos radiantes emiten energía en unidades discretas o cuántos de radiación, siendo la energía proporcional a la frecuencia de la luz). En esta era las cuatro interacciones fundamentales estaban unificadas en una sola gran interacción. Al final de la era de Planck (10^{-43} *segundos* después de la Gran Explosión), la densidad y la temperatura del Universo eran aproximadamente 10^{97} kilogramos por metro cúbico y 10^{32} $°K$ (grados Kelvin) respectivamente. Para tener una idea de lo grandes que son estos números, notemos que la densidad del agua es 10^3 (mil) kilogramos por metro cúbico. Por otro lado la temperatura en la superficie del Sol es aproximadamente unos cinco mil ochocientos grados Kelvin ($5.8 * 10^3$ $°K$).

Para $t < 10^{13}$ *segundos* la temperatura del Universo se puede calcular en función del tiempo a partir de la ecuación:

$$T(t) = \frac{1.518 * 10^{10}}{t^{1/2}} \, °K \qquad (3)$$

donde el tiempo t está expresado en segundos. La ecuación (3) se puede deducir a partir de la ecuación de Friedmann *B1* descrita en el apéndice B.

2.- Era de las Grandes Teorías Unificadas (GTU): En esta época, El Universo tiene una estructura en forma de espuma espaciotemporal. Las interacciones electrodébiles y fuertes están unificadas. Probablemente existían partículas superpesadas (10^{15} veces más pesadas que el protón) además de tres generaciones de quarks y leptones (incluyendo sus respectivas antipartículas) y trece partículas mensajeras (los bosones débiles cargados $W^{\pm}$ y la partícula $Z°$, ocho gluones, el fotón de luz y el gravitón). Al final de la era GTU

(10^{-36} *segundos* después del gran estallido) la temperatura del Universo era $10^{28}\,°K$. La densidad del Universo era 10^{80} kilogramos por metro cúbico.

En los primeros instantes después de la Gran Explosión, había iguales cantidades de materia y antimateria. Sin embargo, antes de que la edad del Universo fuera 10^{-35} segundos, violentas colisiones entre partículas crearon las condiciones para que se produjera una asimetría entre materia y antimateria. Esta asimetría ha dominado el Universo desde entonces, y por eso nuestro Universo está formado de materia.

3.- Era Hadrónica: Las interacciones electrodébiles y fuertes se separan. Hasta 10^{-12} segundos después de la gran explosión, las interacciones débil y electromagnética están unificadas (interacción electrodébil). La escala de energía a la cual se produce la unificación de las interacciones electromagnética y débil es del orden de 1 Tev (el equivalente a mil veces la masa del protón). En el Fermilab se alcanzan energías equivalentes a las que existieron en el Universo primitivo 10^{-12} segundos después de la Gran Explosión.

Los quarks se condensan para formar hadrones (mesones y bariones) a una energía equivalente a la masa del protón. Al juntarse un quark con un antiquark se forman los mesones, por ejemplo, el pión con carga positiva π^+. Al juntarse tres quarks se generan bariones, como por ejemplo, el protón y el neutrón. Al final de la era hadrónica (10^{-6} *segundos*), la temperatura era $10^{13}\,°K$. La densidad del Universo era 10^{20} kilogramos por metro cúbico.

4.- Era Leptónica: 10^{-6} segundos después de la Gran Explosión los antiquarks se aniquilan. Quarks pesados como los quarks c (charm), s (strange), t (top) , b (bottom) han decaído, dejando únicamente un remanente de quarks ligeros (u,d), lo cual explica la abundancia observada de protones y neutrones en el Universo. Por la misma época, los antimuones se habían aniquilado y los muones se habían desintegrado. Finalmente, al cabo de un segundo se habían aniquilado los positrones, quedando solamente protones, neutrones, electrones, neutrinos, fotones y gravitones. Al final de la era leptónica (1 segundo después del Big-Bang), la temperatura del Universo era $10^{10}\,°K$ (diez mil millones de grados Kelvin), y su densidad era aproximadamente 10^{8} (cien millones) de kilogramos por metro cúbico.

5.- Era del plasma o de radiación: El Universo es una sopa de partículas ionizadas o plasma. En esta era se sintetizan núcleos ligeros, como por ejemplo núcleos de deuterio, helio, tritio. El primer paso para la formación de núcleos ligeros es la fusión de dos protones generándose un núcleo de deuterio, un positrón y un neutrino tipo electrón. Cuando un protón interacciona con un núcleo de deuterio se genera un núcleo de ${}_{2}^{3}He$ y un fotón de luz. A su vez, dos núcleos de ${}_{2}^{3}He$ pueden interaccionar para producir un núcleo de ${}_{2}^{4}He$ y dos protones. Los núcleos de tritio se generan cuando los protones reaccionan con los núcleos de deuterio, produciéndose adicionalmente positrones y neutrinos tipo electrón. Todo esto ocurrió cuando la edad del Universo era aproximadamente tres minutos, la temperatura era 10^9 $°K$ (mil millones de grados Kelvin) y la densidad era 10^4 (diez mil) kilogramos por metro cúbico.

Debido al decaimiento de los neutrones (los neutrones libres tienen una vida promedio de quince minutos), la población de neutrones disminuyó ligeramente, de manera que por el tiempo en el que casi todos los neutrones estaban ligados a partículas alfa (núcleos de ${}_{2}^{4}He$) la distribución de bariones llego a ser 13% de neutrones y 87% de protones. Puesto que las partículas alfa están formadas por dos protones y dos neutrones, esta nucleosíntesis primitiva produjo alrededor del 26% en peso de helio, siendo la materia restante básicamente protones libres. Pasaron ochocientos mil años antes de que la temperatura descendiera hasta tres mil grados Kelvin, momento en el cual la energía térmica cayó por debajo de la energía de ionización del hidrógeno y los protones y electrones libres se combinaron formando hidrógeno atómico. En esta época, el material cosmológico se hizo transparente a la luz, es decir materia y radiación se desacoplaron. Al final de esta era, la densidad de energía (energía por unidad de volumen) de la radiación era 10^{-18} kilogramos por metro cúbico y era igual a la densidad de energía de la materia. A partir de este momento, la densidad de energía del Universo comenzó a estar dominada por la materia.

6.- Era de la materia: Las galaxias y cúmulos de galaxias se formaron por atracción gravitacional, una vez transcurridos 10^{16} segundos (trescientos millones de años) de la gran explosión. El proceso exacto de formación de las galaxias no es muy bien conocido (en la referencia (9) se describe un posible modelo para la formación de galaxias: "formación jerárquica de galaxias") .

A los 10^{17} segundos (alrededor de tres mil millones de años) del estallido inicial, una nube gigantesca de gas y polvo comienza a colapsarse (debido a la acción de la gravedad). Esta nube tiene miles de millones de kilómetros y se va convirtiendo en un disco plano y giratorio, o sea una nébula solar. Dentro de este disco, las partículas chocan y se juntan, y es así como el Sol y los planetas luchan por surgir. A medida que el Sol se enciende, la mayoría del gas del Sistema Solar recién formado se disipa y quedan solamente los mundos gaseosos y rocosos. Choques enormes forman el planeta que nosotros llamamos Tierra, y choques similares contribuirían a la formación de Mercurio, Venus, Marte y Plutón. Los planetas grandes y ligeros como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno surgieron del bloque de elementos ligeros situados cerca del borde del disco. En la actualidad, el Universo se halla inmerso en un mar de radiación térmica, cuya temperatura es $2.726\ ^\circ K$ (está temperatura es bajísima, y es bastante cercana a la temperatura del cero absoluto ($0^\circ K$) en la que todos los movimientos moleculares cesan).

VIII. VELOCIDAD DE ESCAPE Y AGUJEROS NEGROS

Si ustedes lanzan un objeto hacia arriba con una cierta velocidad, notarán que el objeto después de alcanzar una altura máxima, vuelve a caer. Si le imprimen un poco más de velocidad al objeto, ascenderá un poco más, pero nuevamente volverá al suelo. Nos preguntamos entonces, si podrá existir alguna velocidad tal que si nosotros lanzamos un objeto hacia arriba con dicha velocidad, el objeto no retornará al suelo. La respuesta es afirmativa. A dicha velocidad se le conoce con el nombre de velocidad de escape. La velocidad de escape es la velocidad mínima con la cual debe ser lanzado un objeto sobre la superficie de un planeta o una estrella para que llegue al infinito, venciendo el campo gravitacional del cuerpo celeste que abandona. La magnitud de la velocidad de escape se puede calcular a partir de la ecuación: $v = \sqrt{2GM/R}$, donde G es la constante de gravitación Universal, M es la masa del cuerpo celeste, y R representa su radio.

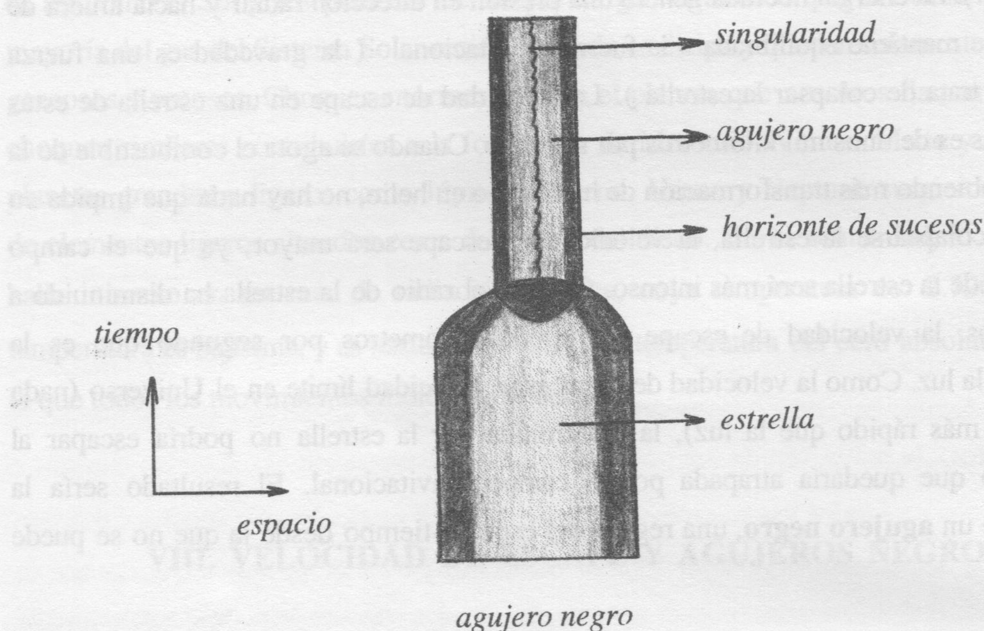
La velocidad de escape para un objeto lanzado desde la superficie de la Tierra es 25.000 millas por hora, aproximadamente. Esa es la velocidad de un transbordador espacial, por ejemplo. La velocidad de escape en el Sol es 617.5 kilómetros por segundo, es decir un poco más de dos millones de kilómetros por hora.

Imaginemos ahora que tenemos una estrella con una masa equivalente a 10 veces la masa del Sol y con un radio de casi cinco veces el radio del Sol. Durante la mayor parte de la vida de la estrella, que dura casi unos mil millones de años, ésta genera calor en su centro, debido a la transformación continua de hidrógeno en helio (una estrella es una especie de horno nuclear). La energía liberada genera una presión en dirección radial y hacia afuera de la estrella que mantiene equilibrada a la fuerza gravitacional (la gravedad es una fuerza atractiva que trata de colapsar la estrella). La velocidad de escape en una estrella de estas características es de unos mil kilómetros por segundo. Cuando se agota el combustible de la estrella no habiendo más transformación de hidrógeno en helio, no hay nada que impida su colapso. Al colapsarse la estrella, la velocidad de escape será mayor, ya que el campo gravitacional de la estrella será más intenso. Cuando el radio de la estrella ha disminuido a 30 kilómetros, la velocidad de escape es 300000 kilómetros por segundo que es la velocidad de la luz. Como la velocidad de la luz es la velocidad límite en el Universo (nada puede viajar más rápido que la luz), la luz emitida por la estrella no podría escapar al infinito, sino que quedaría atrapada por el campo gravitacional. El resultado sería la formación de un **agujero negro**, una región del espacio-tiempo desde la que no se puede escapar.

El contorno del agujero negro se llama horizonte de sucesos, su radio está dado por la fórmula de Schwarzschild $r_S = 2GM/c^2$ (2). Para una estrella con una masa equivalente a 10 masas solares, el radio de Schwarzschild es 30 km. Si el Sol se convirtiera en un agujero negro, su radio de Schwarzschild sería 3 km. Si la Tierra se convirtiera en un agujero negro (esto por supuesto es imposible), su tamaño sería más o menos 1 centímetro. Dentro del agujero negro la estrella continúa colapsándose hasta una singularidad (una singularidad es una región del espacio-tiempo en la que todas las leyes físicas conocidas fallan y la curvatura del espacio llega a ser infinita).

Hay buenas pruebas de la existencia de agujeros negros; por ejemplo la fuente de rayos X conocida como Cygnus X-1. También es muy probable que en el núcleo de nuestra galaxia exista un agujero negro con una masa equivalente a dos mil millones de veces la masa del Sol. También podría haber agujeros negros mucho más pequeños esparcidos por todo el Universo, formados no por el colapso de estrellas, sino por el colapso de regiones fuertemente comprimidas en el medio denso y caliente que existió después de la Gran Explosión. A estos agujeros negros se les denomina *agujeros negros primarios* . Un

agujero negro de estas características pesaría unas mil millones de toneladas (la masa de una montaña) y tendría un radio de unos 10^{-15} metros (el tamaño de un protón).



agujero negro

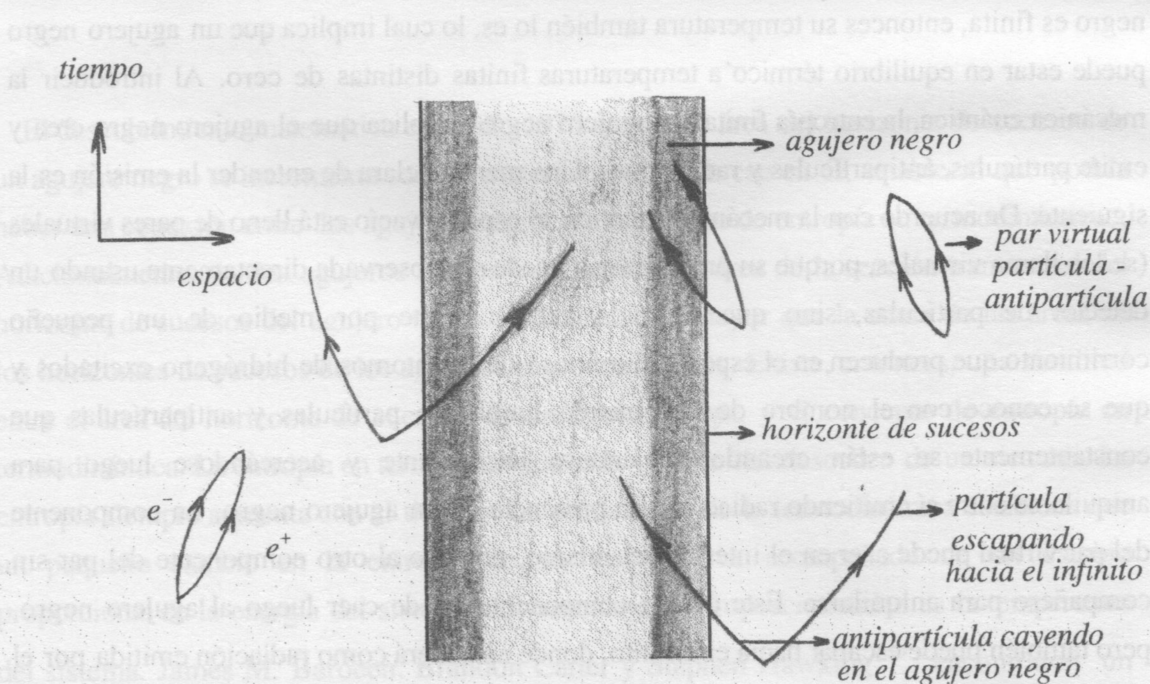
El descubrimiento matemático en el año 1970 de que el área del horizonte de sucesos de un agujero negro se incrementa cuando materia o radiación cae en él, estableció que podría haber una conexión entre los agujeros negros y el concepto de entropía en termodinámica. Adicionalmente, si dos agujeros negros colisionaran, el área de la sección transversal del horizonte de sucesos del agujero negro resultante sería mayor que la suma de las áreas de los horizontes de sucesos de los agujeros negros originales. Existe, entonces, una similitud entre el área del horizonte de sucesos de un agujero negro y el concepto de entropía en termodinámica. La entropía en termodinámica es la medida del desorden de un sistema. La entropía siempre aumenta con el tiempo. La primera ley de la termodinámica establece que un pequeño cambio en la entropía de un sistema, va acompañado de un cambio proporcional en la energía del sistema. La constante de proporcionalidad es la temperatura del sistema. James M. Bardeen, Brandon Carter y Stephen Hawking[10] encontraron un comportamiento similar en un agujero negro: un cambio en la masa de un agujero negro va acompañado con un cambio en el área del horizonte de sucesos. El factor de

proporcionalidad es la “gravitación superficial” que es una medida de la intensidad del campo gravitacional en el horizonte de sucesos. Entonces, el área del horizonte de sucesos es análogo a la entropía y la gravitación superficial sería el análogo a la temperatura. La gravitación superficial es la misma en todos los puntos del horizonte de sucesos, de manera análoga a lo que ocurre con la temperatura, que es la misma en todos los puntos de un sistema en equilibrio térmico.

Cuando un objeto se colapsa para formar un agujero negro (por ejemplo una estrella con 10 veces la masa del Sol), se pierde toda la información del objeto que se colapsó a excepción de la masa, el momentum angular (la inercia de rotación de un objeto que gira se conoce como momentum angular) y la carga eléctrica. Es decir que se pierde una gran cantidad de información en el colapso gravitacional. Usando el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica (el principio de incertidumbre de Heisenberg establece la imposibilidad de realizar una medición arbitrariamente exacta de un proceso a nivel atómico o nuclear; el proceso será perturbado por el acto de la medición), se puede demostrar que el número de configuraciones que podrían formar un agujero negro con una masa, momentum angular y carga dadas es finito. El logaritmo natural de este número se puede interpretar como la entropía del agujero negro (en termodinámica la entropía se define como el logaritmo natural del número de estados accesibles del sistema). Si la entropía del agujero negro es finita, entonces su temperatura también lo es, lo cual implica que un agujero negro puede estar en equilibrio térmico a temperaturas finitas distintas de cero. Al introducir la mecánica cuántica, la entropía finita del agujero negro , implica que el agujero negro crea y emite partículas, antipartículas y radiaciones. Una manera clara de entender la emisión es la siguiente: De acuerdo con la mecánica cuántica, el espacio vacío está lleno de pares virtuales (se los llama virtuales, porque su presencia no puede ser observada directamente usando un detector de partículas, sino que se mide indirectamente por medio de un pequeño corrimiento que producen en el espectro luminoso de los átomos de hidrógeno excitados y que se conoce con el nombre de corrimiento Lamb) de partículas y antipartículas que constantemente se están creando, alejándose inicialmente y acercándose luego para aniquilarse entre sí emitiendo radiación. En presencia de un agujero negro, un componente del par virtual puede caer en el interior del mismo, dejando al otro componente del par sin compañero para aniquilarse. Este último componente puede caer luego al agujero negro, pero también puede escapar hacia el infinito, donde aparecerá como radiación emitida por el agujero negro.

Vemos entonces que los efectos cuánticos son tan importantes, que debido a un efecto muy similar al efecto túnel de la mecánica cuántica, el agujero negro podría evaporarse emitiendo radiación. Un agujero negro primario tardaría en evaporarse unos diez mil millones de años. A un agujero negro formado por el colapso de una estrella le esperaría un destino similar, aunque tardaría en evaporarse mucho más: 10^{66} años o más. La última etapa de la evaporación de un agujero negro puntual ocurriría tan rápidamente que terminaría en una enorme explosión, equivalente a la detonación de diez millones de bombas de hidrógeno de un megatón. Esto generaría una erupción masiva de rayos gamma de alta energía que podría ser observada usando detectores de rayos gamma a bordo de satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra. El hecho de que los agujeros negros terminen evaporándose es una indicación de que la mecánica cuántica puede eliminar las singularidades predichas por la T.G.R.

La gran explosión parece la explosión de un agujero negro a gran escala, de ahí que si se logra entender cómo un agujero negro crea y emite partículas, se llegará a entender cómo la Gran Explosión lo creó todo en el Universo. En un agujero negro, la materia se colapsa y se pierde para siempre; sin embargo, debido a que el agujero negro puede emitir térmicamente, se crea nueva materia. Pudo entonces darse una fase inicial en el Universo en la que la materia se colapsó para ser creada nuevamente en la Gran Explosión.



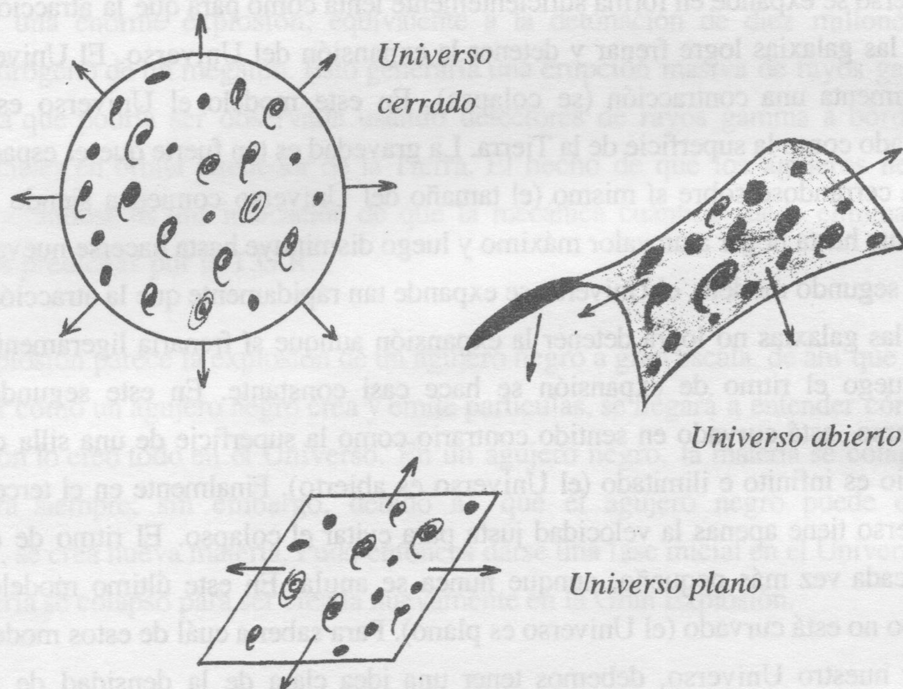
Emisión de partículas y antipartículas desde un agujero negro

IX. DESTINO DEL UNIVERSO

Existen tres modelos que satisfacen la suposición de Friedmann sobre la homogeneidad e isotropía del Universo a gran escala. En el primero (el que encontró Friedmann), el Universo se expande en forma suficientemente lenta como para que la atracción gravitatoria entre las galaxias logre frenar y detener la expansión del Universo. El Universo entonces experimenta una contracción (se colapsa). En este modelo el Universo es finito, pero ilimitado como la superficie de la Tierra. La gravedad es tan fuerte que el espacio-tiempo se curva cerrándose sobre sí mismo (el tamaño del Universo comienza siendo igual a cero, aumenta hasta llegar a un valor máximo y luego disminuye hasta hacerse nuevamente cero). En el segundo modelo, el Universo se expande tan rápidamente que la atracción gravitatoria entre las galaxias no logra detener la expansión aunque sí frenarla ligeramente, de manera que luego el ritmo de expansión se hace casi constante. En este segundo modelo el Universo está curvado en sentido contrario como la superficie de una silla de montar; el espacio es infinito e ilimitado (el Universo es abierto). Finalmente en el tercer modelo, el Universo tiene apenas la velocidad justa para evitar el colapso. El ritmo de expansión se hace cada vez más pequeño, aunque nunca se anula. En este último modelo el espacio-tiempo no está curvado (el Universo es plano). Para saber a cuál de estos modelos se ajusta mejor nuestro Universo, debemos tener una idea clara de la densidad de masa-energía presente en el Universo, así como también del ritmo actual de expansión.

La velocidad de escape juega también un papel crucial a la hora de saber cuál es la densidad crítica del Universo. Si suponemos que el Universo es una gran esfera de masa M y radio R, entonces una galaxia con una velocidad dada escapará al infinito si su energía total que es la suma de su energía cinética y su energía potencial gravitacional, es igual a cero. Esto nos permite demostrar que la densidad crítica depende del parámetro de Hubble de acuerdo con la ecuación: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$. Tomando el valor más bajo del ritmo de expansión (H = 50 km/seg y por megaparsec), se puede verificar que la densidad crítica del Universo sería el equivalente a unos 3 átomos de hidrógeno por metro cúbico. Si la densidad promedio del Universo es menor que la densidad crítica, entonces el Universo se expandirá para siempre y tendrá una muerte lenta. Al final, toda actividad organizada cesará y el Universo experimentará la denominada muerte térmica. Si la densidad promedio del Universo es mayor que la densidad crítica, entonces la gravedad hará que la expansión

eventualmente se detenga, comenzando una contracción (Gran Implosión) que dará origen a un estado superdenso. Probablemente se produzca luego otra expansión y el Universo continúe oscilando indefinidamente. Si tal contracción se produce, no comenzará sino en unos 15 mil millones de años.



Modelos del Universo

La densidad de energía total observada es aproximadamente un 10% de la densidad crítica. La mayor parte de esta densidad está presente en una forma no visible denominada materia oscura, cuya presencia se puede inferir a partir de las curvas de rotación de galaxias espirales y del movimiento de galaxias en cúmulos. La materia oscura probablemente está formada por partículas de masa mayor a 0.6 electrón-voltios (11) (un millonésima parte de la masa del electrón). También se ha sugerido la posibilidad de la existencia de partículas hipotéticas con una masa de 10^{-5} electrón-voltios ($2 * 10^{-11}$ de la masa del electrón) llamadas axiones invisibles. La evidencia acumulada hasta el presente nos dice que probablemente el Universo se expanda para siempre. Si es así, el Universo parece destinado a seguir expandiéndose hasta quedar finalmente detenido en un estado de equilibrio termodinámico y máximo desorden después del cual ya nada ocurrirá (12). Sin embargo, no se puede descartar la existencia de algún tipo de materia (todavía no vista) que

haga que la densidad del Universo se eleve hasta el valor crítico. Por otro lado, un equipo de físicos japoneses y norteamericanos (colaboración Super-Kamiokande) han presentado recientemente evidencia de que los neutrinos poseen masa (XVIII International Conference on Neutrino Astrophysics and Astrophysics, Takayama, Japan). Si la evidencia es correcta, esta masa podría eventualmente contribuir a que la densidad de energía del Universo se eleve probablemente hasta alcanzar la densidad crítica.

APENDICE A

La Teoría General de la Relatividad se resume en la siguiente ecuación tensorial[2,3,4]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad (A1)$$

donde $R = g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}$. A $R_{\mu\nu}$ se le denomina Tensor de Ricci, y determina la curvatura del espacio-tiempo. $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico; este tensor determina las propiedades métricas del espacio-tiempo. $T_{\mu\nu}$ es el tensor energía-cantidad de movimiento. G es la constante de gravitación universal; su valor es $6.67 * 10^{-11} \frac{Newton\ m^2}{kg^2}$. Finalmente, c es la velocidad de la luz (trescientos mil kilómetros por segundo).

APENDICE B

A partir de las ecuaciones de campo de Einstein (ecuación A1), y suponiendo que el Universo es isótropo y homogéneo a gran escala (a nivel de galaxias y cúmulos de galaxias en el espacio profundo), se pueden deducir las ecuaciones de Friedmann[2,3,4]:

$$H^2(t) = \left(\frac{1}{R}\left(\frac{dR}{dt}\right)\right)^2 = \frac{8\pi}{3}\frac{G\rho}{c^2} - \frac{K}{R^2} + \frac{\lambda c^2}{3} \qquad (B1)$$

$$\frac{1}{R}\left(\frac{d^2 R}{dt^2}\right) = -\frac{4\pi}{3}\frac{G}{c^2}(\rho + 3P) + \frac{\lambda c^2}{3} \qquad (B\,2)$$

en donde H representa el parámetro de Hubble que es una medida del ritmo de expansión del Universo y depende del tiempo (t), R es un factor de escala que depende del tiempo y que es proporcional al tamaño del Universo, K es un parámetro independiente del tiempo que especifica la curvatura del Universo, λ es la constante cosmológica introducida por Einstein (es una medida de la contribución a la densidad de energía del Universo debido a las fluctuaciones del vacío. Originalmente, Einstein la introdujo para evitar la expansión del Universo, ya que él creía en un Universo estático.) , ρ representa la densidad de masa-energía del Universo, P es la presión de la radiación, G es la constante de gravitación Universal y finalmente c^2 es el cuadrado de la velocidad de la luz. El término que contiene la constante cosmológica en $(B\,1)$ y $(B\,2)$ se deriva a partir de una fuerza de repulsión cósmica dada por $F = \frac{\lambda r m c^2}{3}$ donde m es la masa del objeto repelido, r es la distancia al objeto repulsor y c es la velocidad de la luz.

Agradecimiento: Deseo expresar mi agradecimiento a Bruce Hoeneisen, Carlos Montúfar, Carlos Marín I., Diego Quiroga, Gustavo Fierro y Teresa Guerrero por sus valiosos comentarios y sugerencias; a Edwin Fuentes por su gentil ayuda en la impresión de este artículo.

Referencias:

(1) - Stephen W. Hawking, Historia del Tiempo, Círculo de Lectores (1988).

- Jay M. Pasachoff, Contemporary Astronomy, Saunders College Publishing (1989).

(2) - Hans C. Ohanian, Gravitation and Spacetime, W.W. Norton & Company,Inc. (1976).

- C. Misner, K. Thorne and J. Wheeler, Gravitation, W. H. Freeman & Company (1973).

- Steven Weinberg, Gravitation and Cosmology, John Wiley & Sons, Inc. (1972).

(3) E. W. Kolb and M. S. Turner, The Early Universe, Addison Wesley (1994).

(4) Particle Properties Data Booklet (1994, 1998).

(5) Carlos Marín y Bruce Hoeneisen, POLITECNICA, Vol. XVII, No. 1, 45 (1992).

(6) Ver por ejemplo:

- F. Halzen and A. D. Martin, Quarks and Leptons, J. Wiley & Sons (1984).

- V. Barger and R. Phillips, Collider Physics, Addison Wesley (1988).

- Paul Davies, Superforce, Simon and Schuster, New York (1984).

- Chris Quigg, Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions, Addison Wesley (1983).

(7) Algunos buenos libros en los que se trata en detalle la evolución del Universo en sus primeras etapas son:

- Paul Davies, The Accidental Universe, Cambridge University Press (1984).

- Joseph Silk, The Big Bang, W.H. Freeman and Company, New York (1989).

- Steven Weinberg, The First Three Minutes, Andre Deutsch, London (1977).

- James William Rohlf, Modern Physics from α to Z°, John Wiley & Sons, Inc. (1994).

- Hubert Reeves, Ultimas Noticias del Cosmos, Editorial Andrés Bello,

Santiago-Chile (1996).

(8) El lector que esté interesado en entender los fundamentos de la mecánica cuántica puede revisar las siguientes referencias:

- John Gribbin, En busca del gato de Schrodinger, Salvat Editores, S. A., Barcelona (1986).

- R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. III, Addison Wesley (1965).

- Paul Davies, The New Physics, Chapter 13, Cambridge University Press (1992).

(9) Bruce Hoeneisen, On the Hierarchical Formation of Galaxies and the Density of the Universe, Serie Documentos USFQ No. 18 (1998).

(10) Stephen W. Hawking, "La mecánica cuántica de los agujeros negros", Scientific American (March 1977).

(11) Bruce Hoeneisen, Thermal Physics, Mellen Research University Press (1993).

(12) Paul Davies, The Runaway Universe, J. M. Dent & Sons Ltd. London (1978).



UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

1999